《心理学报》论文自检报告

请作者填写以下内容，粘贴在稿件的首页。

1. 请以“研究亮点”的形式列出最多三条本研究的创新性贡献，总共不超过 200 字。

《心理学报》的目标是发表“既科学优秀，又具有广泛兴趣和意义” (be both scientifically excellent and of particularly broad interest and significance)的心理学前沿研究。如果您的研究只有小修小补的贡献，没有尝试开创新的研究领域(new areas of inquiry)或提出独到见解和创新视角(unique and innovative perspectives)，特别纯粹只是研究没有明确心理学问题的算法或技术的工作，这类研究被本刊接受的机会小，建议另投他刊。

答：首先，面对日益复杂的道路交通，本研究从行人视角出发探究了如何提高行人寻路行为绩效；其次，本研究采用虚拟现实(VR)技术和心理物理学实验对该问题进行了深入探讨，发现在简单路线中发现的主动交互的优势作用，证明了基于具身认知理论的自我参照在人类表征信息过程中的重要作用；最后，本研究对复杂路线中如何更好寻路提供了一种最优的导航方案以服务于人们的出行生活，更有效地提高了行人的寻路绩效。

2. 作者已经投稿或发表的文章中是否采用了与本研究相同的数据？如果是，请把文章附上审查。(我们不赞成作者用同一数据发表多篇变量相同的文章，也不赞成将一系列的相关研究拆成多个研究来发表的做法。)

答：否

3. 管理、临床、人格和社会等领域仅有自我报告(问卷法)的非实验非干预研究，需要检查数据是否存在共同方法偏差(common method bias)。为控制或证明这种偏差不会影响研究结论的效度，你使用了什么方法？采取了哪些措施？(共同方法偏差的有关文献可参见：http://journal.psych.ac.cn/xlkxjz/CN/abstract/abstract894.shtml)基于横断数据，仅有自我报告，仅仅在方便样本中施测，这样的研究数据易取得，但通常创新性价值不大，被本刊接受的机会小。

答：研究中不存在共同方法偏差。

4. 是否报告并分析了效果量(effect sizes; 如：t 检验：Cohen's d; 方差分析：η^2 或 η_p^2; 标准化回归系数)？(很多研究只是机械地报告了效果量，但没有做必要的分析或说明，如效果量是大中小？有什么理论意义或应用意义？)。(在 google 中搜索 “effect size calculator”，可搜到许多计算方便的 APP。效应量的有关解释，中文可参考：http://journal.psych.ac.cn/xlkxjz/CN/abstract/abstract1150.shtml；英文可参看：http://www.uccs.edu/lbecker/effect-size.html

是否报告统计分析的 95% CI？(如，差异的 95% CI; 相关/回归系数的 95% CI)置信区间的有关计算和绘图可参考 https://thenewstatistics.com/itns/esci/)

答：报告并分析了效果量，报告了统计分析的 95% CI。

5. 请写出计划的样本量，实际的样本量。如果二者有差别，请写出理由。以往心理学研究中普遍存在样本量不足导致的低统计功效(power)问题，我们建议在论文的方法部分解释您计算及认定样本量的依据。应该以有一定依据的效果量(effect size)、期望的功效来确定样本量，并报告计算用软件或程序。样本量计划的理由和做法可参考 https://osf.io/5awp4/

答：研究计划样本量 104 人，实际样本量 126 人。避免因实验过程中出现异常状况退出实验。

6. 假设检验中，如果是零假设显著性检验(NHST)，需报告精确 p 值而不是 p 的区间(小于 0.001 的报告区间，其他报告精确 p 值)。你的论文是否符合该项要求？如果是贝叶斯因素，是否已报告其对先验分布假定的敏感性？

答：是的，论文中报告了精确 p 值

7. 为保证论文中数据报告的完备性，统计分析中如果剔除了部分数据，是否在文中报告？原因是什么？包含这部分数据的统计结果如何变化？统计分析中是如何处理缺失数据的？使用量表时是否删除了其中的个别题目？原因是什么？如果包含这部分题目，统计结果会如何变化？是否有测量的项目或者变量没有报告？原因是什么？请写出在论文中的位置。

答：剔除了三个标准差之外的数据，在原文中有报告。

8. 研究用到的未经过同行评议和审查的实验材料、量表或问卷，是否附在文件的末尾以

供审查？如果没有，请写出理由。如果该文发表，您是否愿意公开这些材料与其他研究者共享？

答：研究中并未用到未经过同行评议和审查的实验材料、量表或问卷。

9. 本刊要求作者提供原始数据，请在以下 3 种里选择一种打√：

a) 投稿后将数据发至编辑部邮箱 (√)

b) 数据可以从如下链接中获得 (   )

c)原始数据和程序已在科学数据银行(https://www.scidb.cn/surl/xlxb)上分享 (   )

d)如不能提供，请说明理由或提供有关证明。

10. 您的研究是否是临床干预或实验室实验？ 是(√) 否(   )

如果是，请提供预注册登记号 ____________________。

如果没有，请说明原因 才知晓此项政策，以后研究会先预注册 。

注：临床干预或实验室实验，建议在收集数据前预注册(pre-register)。也鼓励其他实验研究预注册。预注册要求写出所有的研究假设及其支持，以及实验/干预的详细过程和步骤。本期刊的预注册网站是 https://os.psych.ac.cn/preregister (使用说明书见本刊网站"下载中心")或 https://osf.io/ 或 https://aspredicted.org/。如果您的研究有预注册，会显著增加被录用的机会。预注册的重要性可参考 https://osf.io/5awp4/

11. 您的研究如果用到了人类或动物被试，是否得到所在单位伦理委员会的批准？如果是，请把扫描版发至编辑部邮箱。如果否，请说明理由。

答：是的，已经得到所在单位伦理委员会的批准。

12. 是否依据编辑部网站发布的"英文摘要写作注意事项"撰写 400~500 个单词的英文大摘要？英文题目和摘要是否已请英语好的专业人士把关或者已送专业 SCI/SSCI 论文编辑公司修改润色？

答：是

13. 如果第一作者是学生，请导师单独给编辑部(xuebao@psych.ac.cn)发邮件，说明已阅读本文并认真把关。是否已提醒导师给编辑部发邮件？(编辑部收到导师邮件后才会考虑进入稿件处理流程)

答：不涉及。导师是通讯作者，从头至尾参与论文研究设计，数据分析并整篇撰写。

14. 请到编辑部网站首页右侧"下载中心"下载并填写"稿件不涉密证明"，加盖通讯作者单位的保密办公章，把扫描件发至编辑部邮箱(xuebao@psych.ac.cn)。如没有保密办公章，请加盖通讯作者的单位公章。是否已发邮件？

答：是

路线难度和交互方式对行人寻路绩效的影响

摘　要：面对日益复杂的道路交通，本文采用虚拟现实(VR)技术和心理物理学实验从行人角度出发探讨如何提高行人寻路行为绩效。实验 1 首先探讨了路线难度和人机交互方式对行人寻路绩效的影响；实验 2 进一步探讨了复杂路线中如何提高不同交互方式下的寻路绩效；最后通过对实验 1 和 2 的联合分析提出了提高寻路绩效的导航方案。结果发现：空间环境中的路线难度和交互方式会对行人的寻路绩效产生重要影响，简单路线中个体主动使用导航设备可以有效提升其寻路绩效，而在复杂路线中，个体与导航设备被动交互同时辅助固定地图可以有效提高寻路绩效，因此在复杂路线中加入辅助固定地图的被动交互是有效提高寻路绩效的最优导航方案。

关键词：路线难度；交互方式；寻路绩效；空间知识；VR 技术

1 引言

随着城市化的扩张，城市道路变得越来越错综复杂，这给人们的实际寻路行为带来很大的影响。在我们日常出行中，寻路行为贯穿始终，是人们生活中必不缺少的部分。Ishikawa 等人(2008)提出，一个成功的寻路，主要包括三个完整的过程：首先是空间定位—即个体确定寻路的起点和终点的位置与方向；其次是在起点到终点之间规划一条路径以到达目的地；最后，则是执行到目的地的路线。在此过程中，人们需要提取存储在自己头脑中关于周围环境的信息(内部表征)，或参考辅助导航工具如地图等(外部表征)，或者两者兼而有之(Ishikawa et al., 2008)。因此，在城市道路越来越复杂的陌生环境中，人们如何表征环境信息以利于自己的实际寻路行为，特别是在现代导航设备越来越智能的情况下，如何借助辅助导航设备来帮助行人在复杂环境中更好地寻找方向和路线是本文想要关注的问题。

人类的空间感知主要是通过基于外界视觉为主的地标信息和机体自身运动信息来实现空间导航和定位的(Merhav & Wolbers, 2019)。而在已有的关于空间导航的研究中，研究者们更多关注了外界地标或路线等环境信息对空间导航绩效的影响，而忽视了人的本体感知在其中的作用。具体认知理论认为，个体对外界环境信息的感知源于身体的感觉，身体在这个过程中起着重要作用，以及身体在与环境互动中身体对信息表征起着重要的作用。因此将身体运动

整合到导航研究中对于研究人类空间导航至关重要，这就需要涉及到个体表征环境的空间参照框架。O’Keefe 和 Nadel (1979)认为, 根据所选参照物的不同，可以将个体表征信息的空间参照框架分为两种：自我中心参照框架(Egocentric Reference Frame)和环境中心参照框架(Allocentric Reference Frame)。Hart 和 Moore(1973)提出，随着对环境熟悉度的增加，个体表征信息时使用的参考框架(Frames of Reference)会从自我中心(Egocentric)转换为环境中心(Allocentric)。在研究过程中，必须同时考虑内在的个体成分和环境特征，因为它们会影响个体空间参考框架的选择(Shelton & McNamara, 2004; Wolbers & Hegarty, 2010)。

通常情况下，行人步行导航时会手持导航设备，在整个过程中大部分个体都会以自己的身体作为信息参考中心去寻找前进的方向，并且会将自己看到的视觉信息与自身本体和前庭系统感受到的信息结合起来以帮助自己更快地找到路线。但是，并不是所有的人都会选择以自身为参考系去寻找方向，特别是当面对的环境比较复杂和陌生的时候，个体可能会迷失方向，这时候，根据现有的环境信息可能会更快地帮助自己在环境中找到方向。

Siegel 和 White(1975)提出空间表征模型(简称 LRS 模型)，认为在空间导航过程中，个体对空间知识的获取和表征遵循一个层次结构，该结构主要包括三种空间知识，即地标知识、路线知识和地图知识，也代表了个体对空间知识表征的一个连续过程。在该层次结构中地标知识是其他两类知识的基础，如果路线指示中包含了地标，那么指路说明就会变得有意义，也会变得更加明确，特别是更多的局部地标(Raubal & Winter, 2002)会对行人寻路很有帮助。以往的空间寻路研究也表明了地标知识在决策点的重要性(Denis, 1997; Daniel & Denis, 1998)，Denis(1997)认为地标是路线指示中的重要组成部分，地标性建筑在导航中的重要性已经得到了广泛研究和认可。但是，在参考地标时，仍然需要探索和评估个体的空间认知能力(Daniel & Denis, 1998)，也就说在实际的寻路过程中，个体的空间认知能力和环境信息共同影响个体的实际寻路行为，而不仅仅是某一因素的单独影响。

就路线知识而言，长期以来，空间认知研究一方面关注个体在大尺度空间中寻找路线的能力，即寻路能力，另一方面则关注个体获取环境空间知识的能力(Canter & Craig, 1981)。个体的寻路能力是一个复杂的认知问题。在现实生活中，我们通常需要在多种复杂的社会环境中进行寻路，这其中包括外界环境的熟悉程度、复杂程度、拥挤程度以及个体所面临的时间压力等。因此，对个体来说，在不同环境中找到路线并在不同地点之间自由移动并不是一项容易的任务，会受到个体自身因素和外部环境因素的共同影响。首先，就自身因素而言，以

往研究发现，个体的寻路能力与其空间能力(Lawton, 1994)以及方向感(Kozlowski & Bryant, 1977)密切相关。为了成功寻路，个体需要了解各个地点之间的方向、位置关系，而方向感好和方向感差的人在正确识别方向获取方面存在巨大差异(Kozlowski & Bryant, 1977)。此外，个体空间能力还与相关的空间经验有关，比如日常生活中的导航使用经验，电子游戏经验(Chen & Stanney, 1999)等。其次，就环境因素而言，包括环境类型(例如封闭或开放、大或小、地标特征)、环境布局的复杂程度、拥挤程度以及路线难度等均会影响寻路绩效。如 Weisman(1981)认为，环境复杂性是寻路困难的主要原因，迷失方向与环境复杂性高度相关。此外，在复杂的环境中，在环境中迷失方向或者看不懂导航地图给个体寻路带来消极影响(Rousek & Hallbeck, 2011)。而路线知识是重要的导航线索，因为它简化了地图上用户需要理解的导航信息(Proffitt et al., 2003)，可以帮助用户提高导航效率。次外，很多环境特征都需要通过路线来承载，比如地标建筑物、指路标识等都是在路线中呈现以被大家注意到。但是现有的研究更多关注路线难度对驾驶导航行为的影响，由于步行导航和驾车导航在速度、距离等方面有明显的不同，汽车导航服务的概念并不适合行人导航(Millonig & Schechtner, 2007)。因此，我们在本研究中探讨了路线难度对行人步行导航的实际影响，并提出问题 1：路线难度是否会对行人步行导航寻路行为产生影响？

而就地图知识而言，一直以来，地图在传达空间信息和引导人们方向方面发挥着重要作用。目前使用最广泛的为指北的固定地图和跟随行人视角的跟踪地图。Aretz(1991)认为，指北的固定地图表征环境信息时以环境为中心的参考框架，因此具有稳定性，但需要花费心理旋转视角转换的代价，才能将地图上的内容与以自我为中心的视图对齐。相比之下，追踪地图表征环境信息时以自我为参考框架，其好处是与以自我为中心的视图一致，但代价是该地图会随着行人视角的变化而不断变化，因此具有不稳定性，人们必须实时更新转换视角重建认知地图，从而可能会花费更多的认知资源。以往关于地图学习的研究表明，相比个体直接进入导航环境感知信息，地图有助于个体对所在环境的空间表征(Roskos-Ewoldsen et al., 1998)。此外，接触地图也有助于在头脑中形成实际的空间环境(Uttal, 2000)。从理论上讲，导航辅助地图可以非常灵活地显示空间信息，它们可以随着个人在环境中的方向旋转，或提供相对稳定的外部环境空间信息，因此不同的地图类型可能对指示环境信息的侧重点是不同的。Uttal(2000)提出，使用地图为个体提供了一个环境中心的信息参考框架，他们可以在获取新地点信息时使用该空间参照框架。但是，现实情况是大部分人寻找方向时都会以自身位置作为

参考框架，或者根据实际情况灵活选择自我中心或者环境中心参照框架，当个体的空间信息参照框架与外界信息发生矛盾时，就会影响个体的寻路绩效。此外，当个体在使用手机地图导航时，大部分人都会使用导航软件自身默认的地图模式去进行寻路，所以有时候个体并不能很好地理解导航地图所呈现的环境信息，这也可能会给实际的寻路行为带来消极影响。尽管在已有的文献中对地图的学习效果已经进行了研究，但是还需要对不同类型电子地图的有效性进行更深入实证研究，特别是在不同的路线环境中，使用何种地图才能更有效地呈现当前环境信息，使用地图是否比没有地图的效果更好，故我们提出第二个问题 2：在不同的路线中，导航地图类型如何对行人的步行导航产生影响？

在经济迅速发展的今天，使用导航设备寻路已经成为多数人出行的选择。然而，研究发现，频繁地使用导航设备可能会阻碍个体的空间心理表征(Aporta & Higgs, 2005)。但是，现实告诉我们，在不熟悉的环境中走路时，人们使用导航系统获得的空间信息确实帮助大家找到了目的地。此外，有研究者提出，随着导航设备的广泛使用，跟随导航使寻路由过去一项复杂的主动信息搜索、空间更新和决策任务，变成了一项被动的路线跟踪任务(Schwering et al., 2017)。因此，在人使用空间导航过程中，人们与环境或者导航设备的交互方式被认为是至关重要的，因为它会影响个体对空间信息的感知程度。Wilson 等人(1997)区分了两种类型的交互方式：主动交互和被动交互。Gardony 等人(2013)研究表明，个体积极主动地参与环境有利于导航过程中的空间学习，强调了用户与环境主动交互的重要性(Gardony et al., 2013)。Münzer 等人(2006)也提出在辅助导航过程中增加积极主动的学习会对导航效率或空间知识的获取产生积极影响(Münzer et al., 2006)。但是并不是所有的研究结果都支持主动学习的积极作用。Münzer 和 Stahl(2011)比较了从地图、以自我为中心的路线照片或以自我为中心的路线视频中学习室内路线。结果发现，在错误方面，地图与两种以自我为中心条件的学习没有区别；然而，地图条件确实比视频路线引起了更多的犹豫次数，这体现了被动学习的优势。但是，目前的文献无法确切地说明，当我们暴露在新环境中时，作为一个主动的参与者还是被动的学习者有利。特别是，随着现代导航设备的发展与应用，个体在导航过程中不仅涉及到与环境进行交互，也与导航设备发生交互作用，那么这种交互探索究竟哪种方式更优，特别是在不同的路线中导航时，这仍然值得探讨。据此我们提出第三个问题 3：在不同的路线中，交互方式会对行人步行导航产生怎样的影响？

基于此，本研究从行人的角度出发，以影响行人寻路的因素作为解决问题的切入点，使

用 Unity 3D 搭建虚拟寻路场景，采用虚拟现实技术和实验法作为研究方法，探讨不同路线难度和交互方式对行人寻路绩效的影响，以及辅助地图在其中的增强作用，揭示不同难度路线中个体与导航设备交互的有效信息呈现方式。为了实现这个目标，实验 1 探讨路线难度和交互方式对行人寻路绩效的影响；实验 2 在实验 1 基础之上，结合现在城市道路越来越复杂的情况，探讨复杂路线中交互交互方式和地图类型对行人寻路绩效的影响，使用何种导航方式在复杂路线中获取信息可以提高寻路绩效。本研究使用地标识别任务、地标方向判断任务和场景顺序判断来测量被试空间知识的获取情况，同时使用圣巴巴拉方向感量表测量被试的基本空间方向感能力，以便排除个体空间能力差异对因变量所带来的影响。

2 实验 1 路线难度和交互方式对个体寻路绩效的影响

2.1 目的

实验 1 通过探究路线难度(复杂路线与简单路线)和个体交互方式(主动交互与被动交互)对个体寻路绩效和空间知识获取的影响，从而为不同路线中寻路的个体提供更好的导航方案。

2.2 实验设计

实验 1 为 2(路线难度：简单路线、复杂路线)×2(交互方式：主动交互、被动交互)的被试间设计。因变量为寻路绩效：包括寻路总时长、错误次数、转弯正确率以及空间知识任务的正确判断次数与反应时。

2.3 被试

实验招募来自陕西师范大学在校大学生和研究生共 78 名，其中 10 人因在实验过程中产生 3D 眩晕感觉而中途退出实验未能完成，4 人因练习后无法配合鼠标和键盘同时操作而放弃实验，3 人因程序出错而未能保留寻路相关数据，最终保留 61 人，其中女生 46 名，男生 15 名，所有被试年龄均在 17-28 岁之间($M = 20.57$，$SD = 2.72$)，均为右利手，视力或矫正视力正常被试随机分为 4 组，每组人数基本相同，此前未参加过此类实验。所有被试均是在严格的实验伦理下自愿参加并完成实验，试验结束后会支付被试相应的报酬。

2.4 实验设备与刺激材料

(1)场景呈现

虚拟现实场景借助 unity 3D 平台搭建，正式实验场景总面积约为 170m×120m ，虚拟环境通过桌面电脑屏幕呈现给被试，电脑屏幕为 24 寸，分辨率为 1920×1080，刷新率为 60Hz，被试坐在屏幕正前方，视角为水平视角，电脑配置相应的鼠标和键盘。

场景路线的设置布局大致为环形布局，如下图 1、图 2。建筑物均来自 unity 建筑模型，路线相关地标建筑物放置了一些外观有特征的模型，其余为基本建筑模型放置，如图 1,图 2 所示。

本研究共设置两种难度的路线，即简单路线和复杂路线，路线难度的操纵方法参考 Wallet 等人(2008)的方法，考虑到行人的步行速度和实验时间限制，本研究在此基础上进行了一些改变，缩短了整体的路线长度，两种路线长度都改为 500 米左右，误差在 3 米之内，路口数目与原来保持一致。简单路线：500 米，12 个路口，9 个方向变化；复杂路线：500 米，18 个路口，12 个方向变化。将路线通过 A-K 划分为 10 段路，相邻字母表示同一段路，如 A-B，B-C 等，10 段路连起来形成完整的路线。最终，搭建虚拟路线场景面积大致为 170m×120 m，简单路线和复杂路线在同一环境布局，但是路线布局并不一致。完整场景地图见图 1，图 2，场景界面示例见图 3，图 4 。



图 1 简单路线场景地图



图 2 复杂路线场景地图



图 3 学习阶段场景界面



图 4 测试阶段场景界面

(2)空间知识任务材料

①地标辨认任务：电脑屏幕中间随机呈现一张地标图片，要求被试判断在学习阶段是否见过，若见过还需要判断该地标之后自己的方向。地标总共有 24 个，包括 12 个相关地标和 12 个不相关地标(干扰地标)，都是来自 unity 程序的建筑模型，12 个相关地标均匀分布在 10 条路线中，外观有较为明显的特征，每条路线均有 1-2 个，且位于该地标时需直行、左转、右转的地标各 4 个。12 个不相关地标，均为实验场景路线中从来没有出现过的地标建筑物。实验程序由 E-*prime* 软件编写，排除练习实验所用的地标图片，正式实验保留相关地标 9 个，且地标之后直行、左转和右转的各 3 个，然后加入 9 个不相关地标，形成正式的实验，每一个地标建筑物都需要进行 3 次判断。

②地标方向判断任务：和地标辨认任务一起完成，需要被试对自己判断见过的地标进行方向判断，即自己见过某个地标之后是直行、左转还是右转，地标图片和数目和地标辨认任务是一样的。

③顺序判断任务：从实验场景中截取 10 幅场景图，每条路线选取一张，场景图片均为学习阶段的图片，每个场景两两比较，共形成 45 张顺序再认图片。

(3)空间导航基本情况调查问卷

包括个人基本信息，电子游戏时长、导航方式、导航使用频率、圣芭芭拉方向感问卷(Hegaity, Ridiardson, Montello, Lovelace & Subbiah, 2002)。

2.5 实验程序

准备阶段：在填写知情同意书后，实验者向被试介绍整个实验流程，明确被试需要完成的任务，确认被试了解清楚之后，进入实验的练习阶段。

练习阶段：场景不同于正式实验，但是包括正式实验的学习阶段和测试阶段，是一个迷你版本的正式实验，主要目的是为了让被试了解熟悉后面正式的实验流程，同时练习键盘和鼠标的配合操作，被试需要右手使用鼠标控制自己的视角，鼠标可以水平 360°进行旋转，从而改变视角；左手使用键盘“↑、↓、←、→”进行前后左右空间位置的平移，被试需要同时使用鼠标和键盘完成寻路任务。

正式实验学习阶段：路线中间有指路箭头，主动交互的个体需要自己操纵鼠标和键盘在虚拟场景中进行跟随指路箭头从起点走到终点，而被动交互学习的个体需要观看提前录制好

的场景寻路视频，不能进行任何操作。在学习阶段中，被试被告知需要尽可能地去记住自己走过的路线，同时关注沿路的环境特征。

正式实验测试阶段：测试阶段在学习阶段完成后立即开始，所有被试被放置在学习阶段的起点位置，这个时候环境中的指路箭头消失，被试需要操纵鼠标和键盘，从起点出发尽可能又快又准地到达终点，如果在某个路口转弯错误，程序会将被试弹回该路口之前重新选择，直至被试选择正确的转弯路口才会允许通过，同时程序后台记录下被试所有转弯错误次数，寻路任务完成后，使用 E-prime 软件测试被试对刚才寻路环境的空间知识获取情况，最后被试完成空间基本情况调查问卷，整个实验结束。

2.6 结果

2.6.1 被试基本情况分析

(1)相关经验分析

对四组被试相关经验进行单因素方差分析，结果表明，在电子游戏经验方面，四组被试无显著差异，$F(3, 57) = 1.82$，$p = 0.155$，$\eta_p^2 = 0.09$；在 GPS 使用经验方面，四组被试无显著差异，$F(3, 57) = 2.02$，$p = 0.122$，$\eta_p^2 = 0.10$。综上所述，被试的相关经验水平是相似的，可以最大程度排除电子游戏经验和 GPS 使用经验对因变量的影响。

(2)空间方向感能力

经检验，四组被试空间能力的成绩接受正态分布假设($p < 0.05$)，并且满足方差齐性检验。采用单因素方差分析比较四组被试之间空间方向感的差异，结果发现，方差分析结果显著，$F(3, 57) = 4.26$，$p = 0.009$，$\eta_p^2 = 0.18$。因此，在接下来的数据分析中，为了排除空间方向感对因变量带来的影响，把空间方向感作为协变量进行控制分析。

2.6.2 寻路绩效结果分析

(1)描述性统计结果

实验 1 寻路绩效的描述性统计结果如表 1 所示。

表 1 个体寻路绩效的描述性统计($M \pm SD$)

因变量	交互方式	简单路线	复杂路线
走路总时间	主动交互	407.05 ± 22.21	464.86 ± 35.73
	被动交互	446.92 ± 47.55	454.98 ± 45.66
转弯错误次数	主动交互	1.88 ± 1.36	9.87 ± 7.56
	被动交互	5.13 ± 3.11	8.73 ± 5.44
转弯正确率	主动交互	0.89 ± 0.09	0.77 ± 0.16
	被动交互	0.72 ± 0.13	0.76 ± 0.13

(2)寻路绩效方差分析

使用 SPSS23.0 对实验数据进行分析，以路线难度和交互方式为自变量，空间方向感作为协变量，走路时间、转弯错误次数(累加)和转弯正确率为因变量进行双因素协方差分析。

1)走路时间

走路时间在路线难度上的主效应显著，$F(1, 54) = 6.61$，$p = 0.013$，$\eta_p^2 = 0.11$，表明个体在简单路线中的走路时间显著短于复杂路线($M = -24.47$，$SE = 9.52$)。路线难度和交互方式的交互作用显著，$F(1, 54) = 16.17$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.23$，进一步简单效应分析发现，从路线难度来看，在简单路线中，个体走路时长在主动交互方式下显著短于被动交互方式，$F(1, 54) = 10.53$，$p = 0.002$，$\eta_p^2 = 0.16$；而在复杂路线下，个体的走路总时长在被动交互方式下显著短于主动交互方式，$F(1, 54) = 6.6$，$p = 0.013$，$\eta_p^2 = 0.09$(见图 5)。

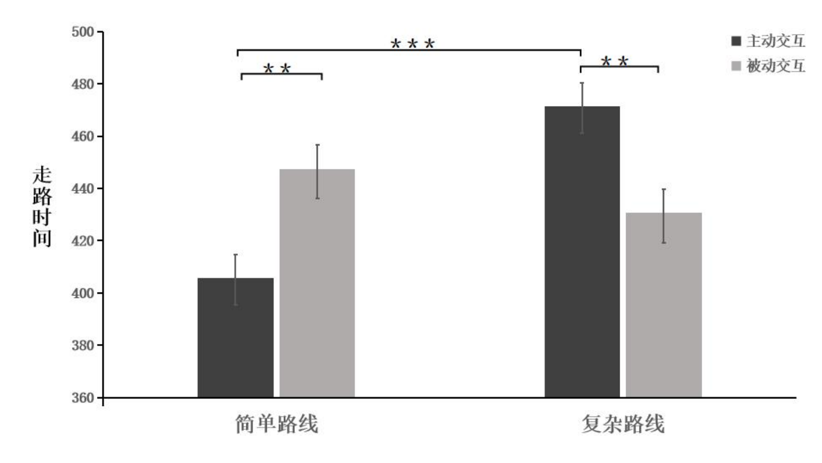


图 5 不同路线难度和交互方式下个体走路时间的差异

注：***$p < 0.001$，**$p < 0.01$，*$p < 0.05$

2)转弯错误次数(累加)

转弯错误次数在路线难度上的主效应显著，F (1, 54) = 21.43，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.28$，表明个体在简单路线中的错误次数显著低于复杂路线(M = -5.28，SE = 1.14)；路线难度和交互方式的交互效应显著，F (1, 54) = 14.62，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.21$。进一步简单效应分析发现，从路线难度来看，在简单路线中，个体在主动交互方式下的转弯错误次数显著少于被动交互方式，F (1, 54) = 4.47，$p = 0.039$，$\eta_p^2 = 0.08$；在复杂路线中，个体在被动交互方式下的转弯错误次数显著少于主动交互方式，F (1, 54) = 10.49，$p = 0.002$，$\eta_p^2 = 0.16$(见图 6)。

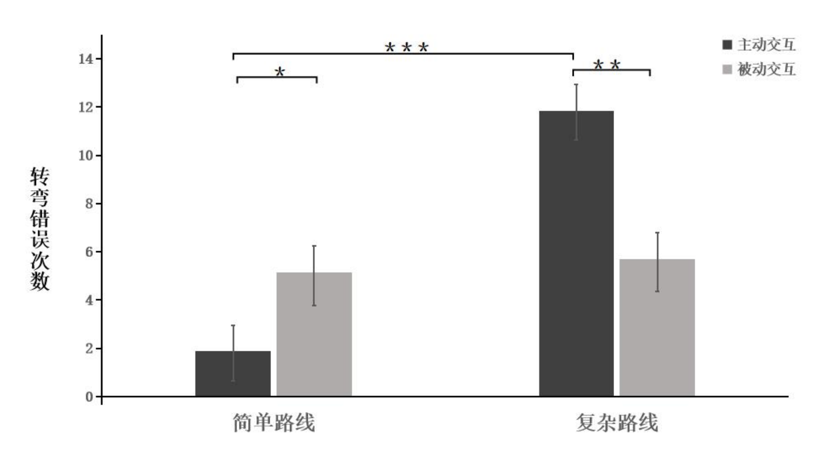


图 6 不同路线难度和交互方式下个体转弯错误次数的差异

注：***$p < 0.001$，**$p < 0.01$，*$p < 0.05$

3)转弯正确率

路口转弯正确率在交互方式上的主效应边缘显著，F (1, 54) = 2.81，$p = 0.099$，$\eta_p^2 = 0.05$，表明个体在主动交互方式下的转弯正确率显著高于被动交互方式。路线难度和交互方式的交互效应显著，F (1, 54) = 8.30，$p = 0.006$，$\eta_p^2 = 0.13$，进一步简单效应分析发现，从路线难度来看，简单路线中，个体在主动交互方式下的转弯正确率显著高于被动交互方式，F (1, 54) = 13.08，$p = 0.001$，$\eta_p^2 = 0.20$；而在复杂路线中，两种交互方式的转弯正确率无显著差异，F (1, 54) = 0.63，$p = 0.43$，$\eta_p^2 = 0.01$(见图 7)。

在寻路绩效上，其余的主效应和交互效应均不显著，$ps > 0.05$。

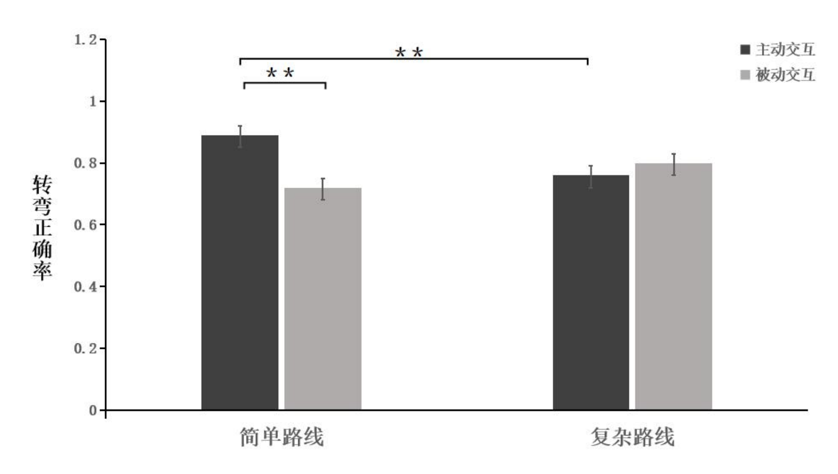


图 7 不同路线难度和交互方式下个体转弯正确率的差异

注：***$p < 0.001$，**$p < 0.01$，*$p < 0.05$

2.6.3 空间知识结果分析

(1)描述统计结果

实验 1 空间知识的描述统计结果如表 2 所示。

表 2 个体空间知识获取情况的描述性统计($M \pm SD$)

因变量		简单路线	复杂路线
地标识别正确次数	主动交互	46.81 ± 4.39	34.00 ± 5.21
	被动交互	43.60 ± 4.45	36.93 ± 4.76
地标识别反应时	主动交互	1652.51 ± 484.32	1892.06 ± 609.01
	被动交互	1552.47 ± 452.41	1597.86 ± 426.54
地标方向辨认正确次数	主动交互	11.12 ± 4.33	5.73 ± 2.92
	被动交互	7.60 ± 3.18	5.60 ± 2.82
地标方向辨认反应时	主动交互	1377.36 ± 722.51	1889.27 ± 780.52
	被动交互	1581.40 ± 713.29	1811.30 ± 855.85
顺序判断正确次数	主动交互	63.81 ± 7.58	63.20 ± 11.35
	被动交互	61.33 ± 8.03	63.73 ± 9.91
顺序判断反应时	主动交互	2260.61 ± 644.79	2517.58 ± 655.47
	被动交互	2264.07 ± 957.49	2108.27 ± 504.19

(2)空间知识方差分析

以路线难度和交互方式为自变量，空间方向感作为协变量，地标辨别判断次数、地标辨别方向正确次数、顺序判断正确次数为因变量进行双因素协方差分析。

1)地标识别任务

地标识别正确次数在路线难度上主效应显著，$F(1, 54) = 53.97$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.50$，表明个体在简单路线中对地标的正确再认次数显著高于复杂路线($M = 9.32$，$SE = 1.27$)。路线难度和交互方式的交互作用显著，$F(1, 54) = 7.60$，$p = 0.008$，$\eta_p^2 = 0.12$。进一步简单效应分析发现，从路线难度来看，在简单路线中，个体正确识别地标的次数在主动交互方式下显著高于被动交互方式，$F(1, 54) = 3.49$，$p = 0.067$，$\eta_p^2 = 0.06$；而在复杂路线中，个体正确识别地标的次数在主动交互方式下显著低于被动交互方式，$F(1, 54) = 4.23$，$p = 0.045$，$\eta_p^2 = 0.07$(见图 8)。

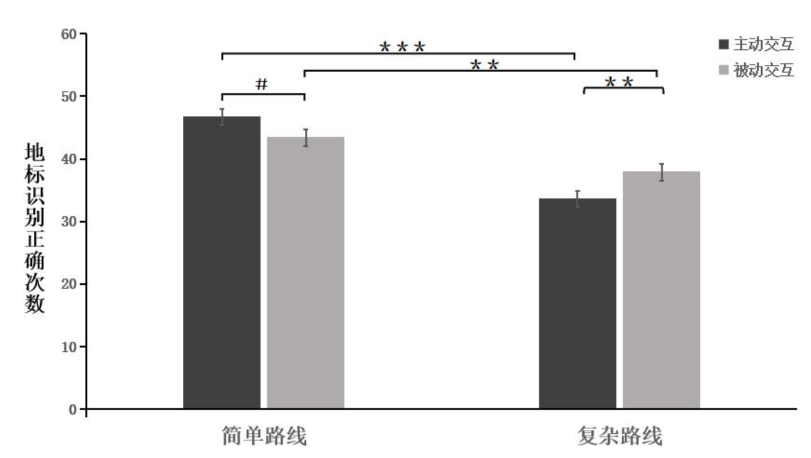


图 8 不同路线难度和交互方式下个体地标识别正确次数的差异

注：***$p < 0.001$，**$p < 0.01$，*$p < 0.05$，$^{\#}p < 0.1$

2)地标方向辨认任务

正确辨认地标方向的次数在路线难度上主效应显著，$F(1,54) = 15.11$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.22$，表明个体在简单路线中对地标之后行走的方向的正确再认次数显著高于复杂路线($M = 3.61$，$SE = 0.93$)；交互方式主效应显著，$F(1,54) = 4.06$，$p = 0.049$，$\eta_p^2 = 0.07$，表明个体在主动交互方式下对地标方向的正确再认次数显著高于被动交互方式($M = 1.99$，$SE = 1.00$)。成对比较发现，在简单路线中，个体在主动交互方式下对地标方向辨认的正确次数显著高于被动交互，$F(1, 54) = 8.33$，$p = 0.006$，$\eta_p^2 = 0.13$(见图 9)。

在空间知识获取结果上，其余的主效应和交互效应均不显著，$ps > 0.05$。

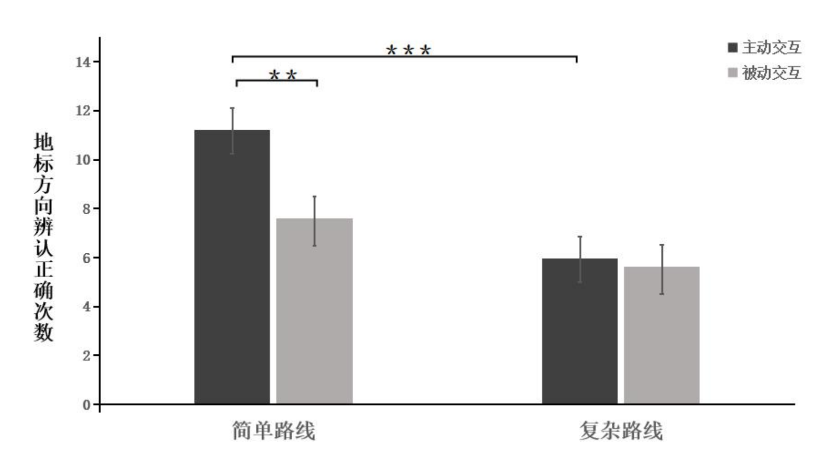


图 9 不同路线难度和交互方式下个体地标方向辨认正确次数的差异

注：***$p < 0.001$，**$p < 0.01$，*$p < 0.05$，#$p < 0.1$

2.6.4 中介效应

最后，我们检验了不同难度路线中关于空间知识的获取对于人们寻路绩效的影响。我们使用 SPSS 的 PROCESS 宏(模型 4)对 1000 个自举重样本进行了中介分析(Hayes, 2018)。

在此模型中，路线难度被输入作为预测因子(0 = 简单路线；1 = 复杂路线)，地标识别正确次数是中介，转弯错误次数是因变量(如图 10)。

如方差分析所示，路线难度在空间知识获取(b = -8.87，SE = 1.29，t = -6.87，$p < 0.001$，95%CI[-11.44，-6.30])方面对寻路绩效产生了显著负向影响。

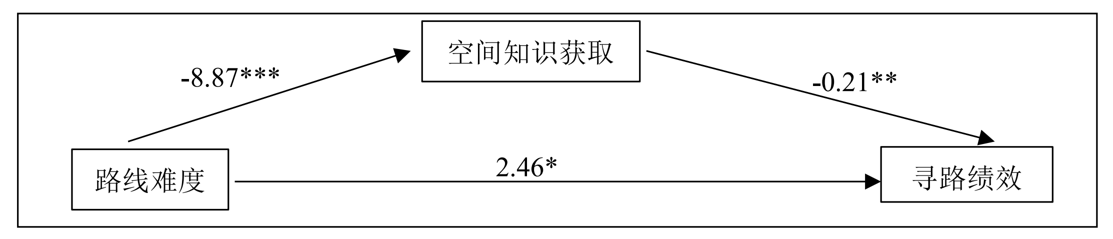


图 10 空间知识获取对于人们寻路绩效的影响

总体方程是显著的，R^2 = 0.334，F(83) = 13.19，$p < 0.001$。该模型显示，空间知识获取(b = -0.21，SE = -0.09，t = -2.53，p = 0.014，95%CI[-0.38，-0.05])显著影响了寻路绩效。

路线难度的直接影响显著，b = 2.46，SE = 1.23，t = 1.99，p = 0.05，95%CI[0.05，0.003]。中介效应显示，空间知识获取(b = 1.90， SE = 0.98，95%CI[0.40，4.07])显著且部分地介导了路线难度和寻路绩效之间的关系。

2.7 讨论

实验 1 目的是为了探讨路线难度和交互方式对行人寻路绩效及空间知识的获取情况。结果发现，从寻路绩效角度来看，路线难度和交互方式对个体的寻路绩效产生重要影响，在简单路线主动交互方式下，被试的走路时间更短、转弯错误次数更少以及转弯正确率最高，支持了具身认知理论的观点。从空间知识角度来看，在地标识别任务和地标方向辨认任务中，简单路线中主动交互的正确判断次数最高，说明被试在该条件下所获得的地标知识和路线知识最优。

实验 1 表明，在简单路线中的主动交互方式寻路绩效最优，但是复杂路线中没有表现出主动交互的优势，反而在某些变量中出现了被动交互的优势。根据具身认知理论观点，主动交互应该是优于被动的，为什么没有出现这种结果？此外，立足于现实情况，随着城市道路逐渐变得复杂，在复杂路线中寻找路线成为一种常态；另一方面，相比简单路线中主动交互在寻路绩效方面表现出的显著优势，复杂路线中两种交互方式在寻路绩效的优越性并不一致，因此还需要继续探讨。并且有研究提出，寻路过程中的地图有助于个体对所在环境的空间表征(Roskos-Ewoldsen et al., 1998)，提高寻路绩效。因此，实验 2 基于实验 1 的结果，一方面在复杂路线中保留两种交互方式进行继续探讨，另一方面加入常见的两种地图，即固定地图和旋转地图，探讨复杂路线中交互方式和地图类型对寻路绩效的影响和增强作用。

3 实验 2 复杂路线中交互方式和地图类型对个体寻路绩效的影响

3.1 目的

基于实验 1 的结果，结合当前城市道路越来越复杂的现实情况，为了提高复杂路线中的寻路绩效，本研究在复杂路线导航中加入地图导航，探究地图类型和交互方式对行人在复杂路线中寻路绩效和空间知识的影响。

3.2 被试

实验 2 共招募被试 85 人，其中 10 人因在实验过程中产生眩晕感而中途退出实验未能完成，4 人因练习后无法配合鼠标和键盘操作而放弃实验，6 人数据因数据在三个标准差之外而被排除，最后保留 65 人，所有被试视力或矫正视力正常，年龄均在 17-25 岁之间(19.91 ± 2.05)，此前未参加过类似实验，随机分为四组，每组人数基本一致。所有被试均是在严格的实验伦理下自愿参加并完成实验，试验结束后会支付被试相应的报酬。

3.3 实验设计

实验 2 采用 2(交互方式：主动交互、被动交互)×2(地图类型：固定地图、旋转地图)的双因素被试间设计，路线均为复杂路线。因变量为寻路绩效：包括走路时间、转弯错误次数、转弯正确率以及空间知识任务的正确判断次数与反应时。

3.4 实验设备与材料

寻路场景和路线与实验 1 是一样的，但是在实验 1 的基础上只保留了复杂路线的场景，同时增加了两种地图，即固定地图和旋转地图，固定地图始终指示北方，不管人与场景如何变化，地图保持静止不动，箭头一直在旋转(如图 11)；而旋转地图随着个体行走的方向一直变化，地图箭头始终保持向上，指示人的行走方向(如图 12)。



图 11 固定地图场景示例图



图 12 旋转地图场景示例图

3.5 实验流程

基本实验流程与实验 1 是一样的，都是现在桌面现实器完成虚拟现实寻路任务，然后在联想电脑上完成空间知识任务，最后完成寻路基本情况调查问卷。

3.6 结果

3.6.1 被试基本情况分析

(1)相关经验分析

对四组被试 GPS 导航使用频率、电子游戏经验进行单因素方差分析。结果表明，在 GPS 使用经验方面，四组被试无显著差异，$F\ (3, 61) = 1.71$，$p = 0.175$，$\eta_p^2 = 0.08$；在电子游戏经验方面，四组被试无显著差异，$F\ (3, 61) = 0.38$，$p = 0.771$，$\eta_p^2 = 0.02$。综上所述，可以最大程度排除电子游戏经验和 GPS 使用经验对因变量的影响。

(2)空间方向感分析

经检验，四组被试空间能力的成绩接受正态分布假设($p < 0.05$)，并且满足方差齐性检验($p > 0.05$)。所以采用单因素方差分析比较四组被试之间空间方向感的差异，结果发现方差分析结果显著，$F\ (3, 61) = 4.08$，$p = 0.01$，$\eta_p^2 = 0.17$。因此，在接下来的数据分析中，为了排除空间方向感对因变量带来的影响，将空间方向感纳入协变量进行控制。

3.6.2 寻路绩效结果分析

(1)描述性统计结果

实验 2 寻路绩效的描述性统计结果如表 3 所示。

表 3 个体寻路绩效的描述性统计($M \pm SD$)

因变量	交互方式	固定地图	旋转地图
走路总时长	主动交互	437.03 ± 17.86	441.64 ± 31.37
	被动交互	421.24 ± 19.32	450.07 ± 31.42
转弯错误次数	主动交互	5.18 ± 2.19	5.27 ± 3.13
	被动交互	3.06 ± 2.05	6.94 ± 3.11
转弯正确率	主动交互	0.84 ± 0.06	0.82 ± 0.08
	被动交互	0.88 ± 0.07	0.76 ± 0.10

(2)寻路绩效方差分析

使用 SPSS23.0 对实验数据进行分析，以地图类型和交互方式为自变量，空间方向感作为协变量，寻路时间、转弯错误次数(累加)和转弯正确率为因变量进行双因素方差分析。

1)走路时间

走路时间在地图类型上的主效应显著，$F\,(1, 58) = 4.20$，$p = 0.045$，$\eta_p^2 = 0.07$，表明个体在固定地图辅助下的走路时间显著短于旋转地图($M = -14.51$，$SE = 7.08$)。二者地图类型和交互方式的交互作用边缘显著，$F\,(1, 58) = 3.33$，$p = 0.073$，$\eta_p^2 = 0.05$，进一步进行简单效应分析，在被动交互方式下，个体走路总时长在固定地图辅助下的走路时间显著短于旋转地图，$F\,(1, 58) = 7.64$，$p = 0.008$，$\eta_p^2 = 0.12$(见图 13)。

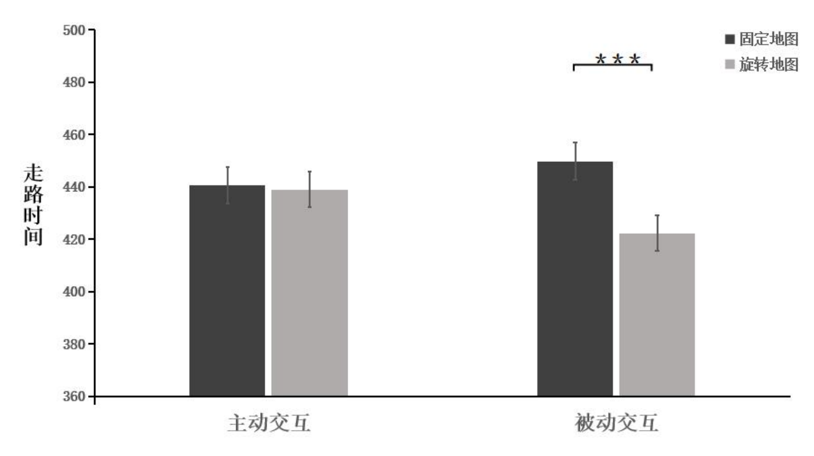


图 13 不同地图类型和交互方式下个体走路时间的差异

注：***$p < 0.001$，**$p < 0.01$,，*$p < 0.05$

2)转弯错误次数(累加错误)

转弯错误次数在地图类型上的主效应显著，$F(1, 58) = 7.17$ ，$p = 0.010$，$\eta_p^2 = 0.11$，表明个体在固定地图辅助下的转弯错误次数显著少于旋转地图辅助($M = -1.97$，$SE = 0.74$)。地图类型和交互方式交互作用显著，$F(1, 58) = 7.11$，$p = 0.010$，$\eta_p^2 = 0.11$。进一步进行简单效应分析发现，在被动交互方式下，个体转弯错误次数在固定地图辅助下的走路时间显著少于旋转地图，$F(1, 58) = 14.55$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.20$(见图 14)。

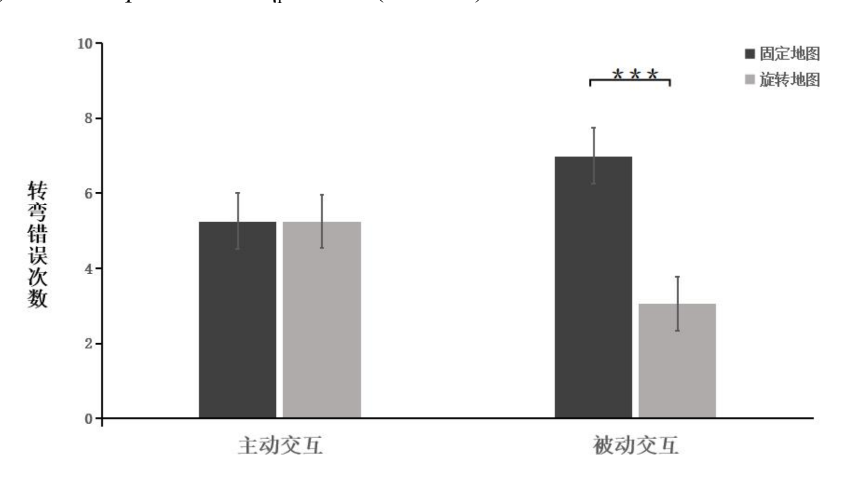


图 14 不同地图类型和交互方式下个体转弯错误次数的差异

注：***$p < 0.001$，**$p < 0.01$，*$p < 0.05$

3)转弯正确率

转弯正确率在地图类型上的主效应显著，$F(1, 58) = 8.44$，$p = 0.005$，$\eta_p^2 = 0.13$，表明个体在固定地图辅助下寻路的转弯正确率显著高于旋转地图辅助下的($M = 0.07$，$SE = 0.02$)。地图类型和交互方式的交互作用显著，$F(1, 58) = 6.37$，$p = 0.014$，$\eta_p^2 = 0.10$，进一步进行简单效应分析发现，在被动交互方式下，个体在固定地图辅助下的转弯正确率显著高于旋转地图，$F(1, 58) = 15.00$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.21$(见图 15)。

在寻路绩效结果上，其余主效应和交互效应均不显著, $ps > 0.05$。

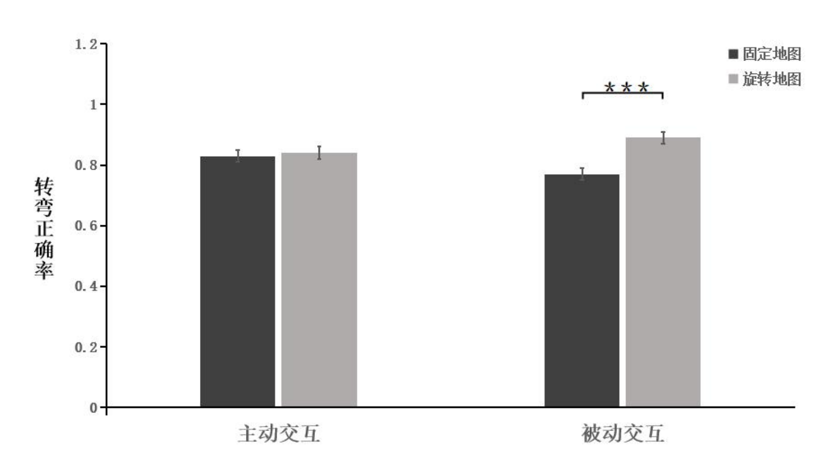


图 15 不同地图类型和交互方式下个体转弯正确率的差异

注：***$p < 0.001$，**$p < 0.01$，*$p < 0.05$

3.6.3 空间知识结果分析

(1)描述性统计结果

实验 2 空间知识描述性统计结果如表 4 所示。

表 4 个体空间知识获取情况的描述性统计($M \pm SD$)

因变量	交互方式	固定地图	旋转地图
地标识别正确次数	主动交互	37.82 ± 5.22	37.24 ± 5.76
	被动交互	37.33 ± 6.39	32.94 ± 5.50
地标识别正确反应时	主动交互	1885.06 ± 587.06	1899.90 ± 723.70
	被动交互	1765.56 ± 457.81	1477.26 ± 422.15
地标方向辨认正确次数	主动交互	6.88 ± 3.28	6.67 ± 2.77
	被动交互	8.41 ± 2.45	5.25 ± 2.89
地标方向辨认正确反应时	主动交互	1795.36 ± 786.97	1960.05 ± 891.20
	被动交互	1814.00 ± 1023.17	1519.64 ± 667.22
顺序判断正确次数	主动交互	68.47 ± 11.16	65.33 ± 7.23
	被动交互	70.06 ± 9.74	60.50 ± 11.96
顺序判断正确反应时	主动交互	2208.38 ± 722.18	2279.49 ± 528.18
	被动交互	2458.45 ± 818.28	1869.15 ± 547.56

(2)方差分析结果

1)地标识别任务

成对比较发现，在被动交互方式下，个体在固定地图辅助下正确识别地标的次数显著高于旋转地图，$F(1, 58) = 4.04$，$p = 0.049$，$\eta_p^2 = 0.07$(见图 16)。

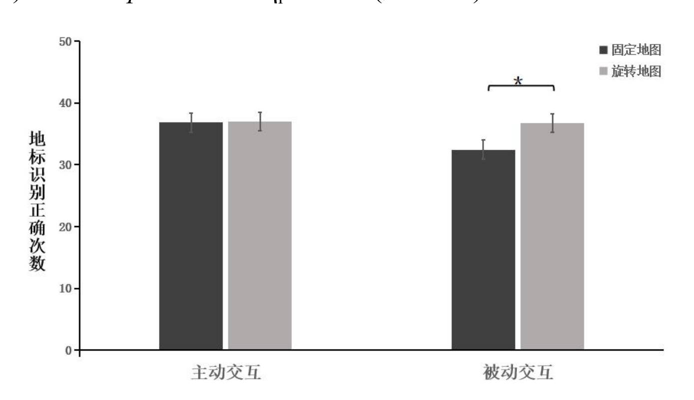


图 16 不同地图类型和交互方式下个体地标识别正确次数的差异

注：***$p < 0.001$，**$p < 0.01$，*$p < 0.05$

2)地标方向辨认任务

正确辨认地标方向的次数在地图类型上的主效应显著，$F(1, 58) = 6.82$，$p = 0.011$，$\eta_p^2 = 0.11$，表明个体在固定地图辅助下寻路时对地标方向的正确再认次数显著高于旋转地图($M = 2.03$，$SE = 0.78$)；地图类型和交互方式交互作用显著，$F(1, 58) = 6.38$，$p = 0.014$，$\eta_p^2 = 0.10$。进一步简单效应分析发现，在被动交互方式下，个体在固定地图辅助下寻路时对地标方向的正确再认次数显著高于旋转地图，$F(1, 58) = 13.44$，$p = 0.001$，$\eta_p^2 = 0.19$(见图 17)。

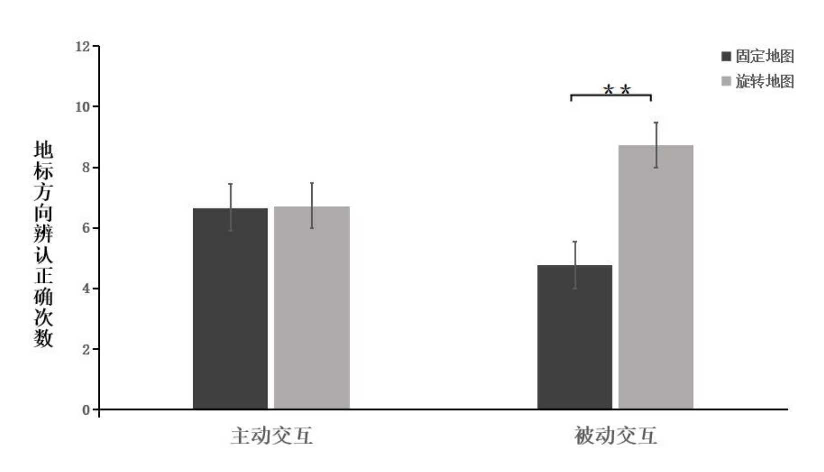


图 17 不同地图类型和交互方式下个体地标方向辨认正确次数的差异

注：***$p < 0.001$，**$p < 0.01$，*$p < 0.05$

3)顺序判断任务

场景顺序正确判断次数在地图类型上的主效应边缘显著，$F(1, 58) = 3.35$，$p = 0.073$，$\eta_p^2 = 0.06$，表明个体在固定地图辅助下寻路时对场景顺序的正确判断次数显著高于旋转地图($M =$

5.02，SE = 2.74)；地图类型和交互方式的交互作用显著，F (1, 58) = 2.83，p = 0.098，η_p^2 = 0.05，进一步简单效应分析发现，在被动交互方式下，个体在固定地图辅助下寻路时对场景顺序的正确判断次数显著高于旋转地图，F (1, 58) = 6.28，p = 0.015，η_p^2 = 0.10(见图 18)。

在空间知识获取结果上，其余主效应和交互效应均不显著, ps > 0.05。

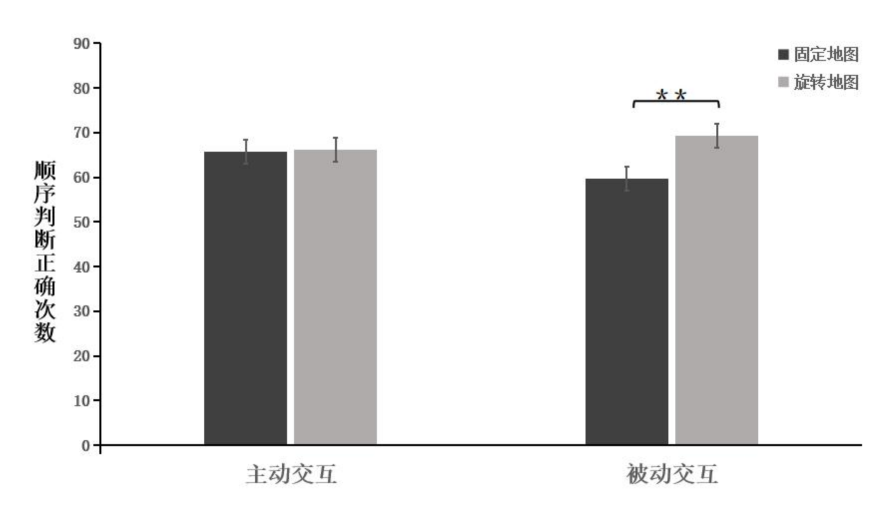


图 18 不同地图类型和交互方式下个体顺序判断正确次数的差异

注：***p < 0.001，**p < 0.01，*p < 0.05

3.6.4 中介效应

最后，我们检验了使用不同类型地图情境下，空间知识获取对于人们寻路绩效的影响。我们使用 SPSS 的 PROCESS 宏(模型 4)对 1000 个自举重样本进行了中介分析(Hayes, 2018)。

在此模型中，地图类型被输入作为预测因子(0 = 固定地图；1 = 旋转地图)，正确辨认地标方向的次数是中介，转弯正确率是因变量(见下图 19)。

方差分析所示，地图类型在空间知识获取(b = -2.03，SE = 0.79，t = -2.57，p = 0.013，95%CI[-3.61，-0.45])方面对寻路绩效产生了显著负向影响。

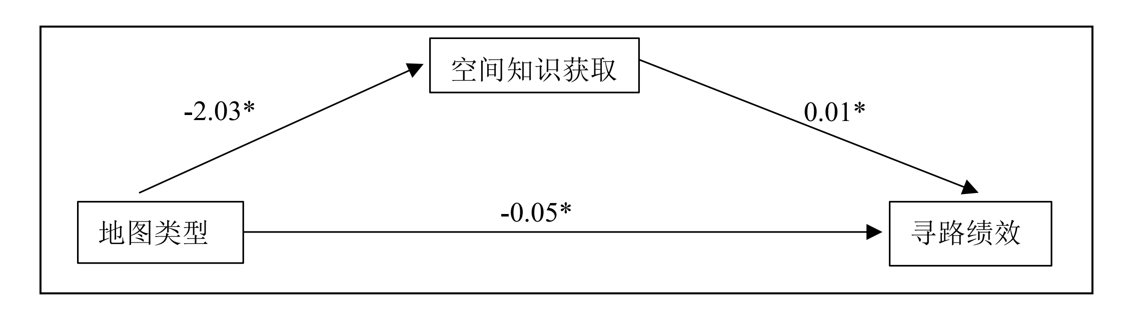


图 19 地图类型下空间知识获取对于人们寻路绩效的影响

总体方程是显著的，R^2 = 0.20，F(65) = 5.16，p = 0.003。该模型显示，空间知识获取(b = 0.01，

$SE = 0.004$，$t = 2.12$，$p = 0.038$，95%CI[0.00，0.015])显著影响了寻路绩效。地图类型的直接影响显著，$b = -0.05$，$SE = 0.02$，$t = -2.17$，$p = 0.034$，95%CI[-0.10，-0.004]。中介效应显示，空间知识获取($b = -0.02$， $SE = 0.01$，95%CI[-0.04，-0.001])显著且部分地介导了路线难度和寻路绩效之间的关系。

3.7 讨论

实验 2 的目的是为了探讨在复杂路线中交互方式和地图类型对寻路绩效的影响。结果发现，从寻路绩效角度来看，在复杂路线中，加入辅助导航地图对个体的寻路绩效均有提高作用，并且，在复杂路线被动交互方式下辅助固定地图产生最优的空间学习效果。从空间知识角度来看，在地标辨认任务、地标方向任务中以及顺序判断任务中，使用被动交互方式辅助固定地图获得的空间知识最优，说明在复杂路线中，使用固定地图表征有利于个体获得空间知识。

实验 2 结果表明了在复杂路线中加入两种辅助地图在主动交互下没有出现显著差异，在被动交互方式下出现了显著差异，并且在四种导航方案下，被动交互方式下使用固定地图的寻路绩效和空间知识获取最优，那么相比实验 1 没有地图辅助下的导航方案，加入实验 2 的最优方案是否真的提升了寻路绩效，需要与无地图辅助的导航绩效进行一个联合对比分析。

4 复杂路线中行人步行导航的方案对比探究

4.1 目的

根据实验 2 的结果，个体在复杂路线中使用固定地图辅助的被动交互方式下寻路绩效和空间知识的获取结果更优，那么相比实验 1 没有地图辅助的复杂被动交互方式下的导航，实验 2 的导航方案是否真的做到了寻路绩效的提升，本节将结果与实验 1 进行对比。

4.2 结果

(1)被试基本情况分析

共包括 48 名被试，男生 11 名，女生 37 名，年龄均在 17-23 岁之间(19.48 ± 1.80)，基本信息如下(见表 5)所示：

表 5 被试基本信息描述统计($M \pm SD$)

组别	个案	年龄
旋转地图	16	19.25 ± 1.29
固定地图	17	19.53 ± 2.07
无地图	15	19.67 ± 2.02
总计	48	19.48 ± 1.80

(2)相关经验分析

对三组被试相关经验进行单因素方差分析，结果表明，在电子游戏经验方面，三组被试在无显著差异，$F(2, 45) = 1.57$，$p = 0.219$，$\eta_p^2 = 0.07$；在 GPS 使用经验方面，三组被试在无显著差异，$F(2, 45) = 1.76$，$p = 0.184$，$\eta_p^2 = 0.07$。综上所述，可以排除电子游戏经验和 GPS 使用经验对因变量的影响。

(3)空间方向感

对空间方向感的方差分析结果显著，$F(2, 45) = 10.01$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.31$，表明三组被试之间的方向感存在显著差异。因此，在接下来的数据分析中，为了排除空间方向感对因变量所带来的影响，将空间方向感作为协变量进行分析。

(4)寻路绩效结果分析

三组被试的寻路绩效的描述性统计结果如表 6 所示。

表 6 三组被试寻路绩效的描述性统计($M \pm SD$)

	走路时间	转弯错误次数	转弯正确率
旋转地图	450.07 ± 31.42	6.94 ± 3.11	0.76 ± 0.10
固定地图	421.24 ± 19.32	3.06 ± 2.05	0.88 ± 0.07
无地图	454.98 ± 45.66	8.73 ± 5.44	0.76 ± 0.13

使用 SPSS23.0，以地图类型(无地图、旋转地图和固定地图)为自变量，以空间方向感作为协变量，对走路总时间、转弯错误次数(累计错误)、转弯正确率和空间知识获取情况进行单因素协方差分析，结果如下：

1)转弯错误次数(累加错误)

转弯错误次数在地图类型上主效应显著，$F(2, 42) = 4.80$，$p = 0.013$，$\eta_p^2 = 0.19$。事后多重比较发现，无地图组转弯错误次数显著高于固定地图组，$M = 3.14$，$SE = 1.53$， $p = 0.046$；旋转地图组转弯错误次数显著高于固定地图组，$M = 4.09$，$SE = 1.34$，$p = 0.004$(见图 20)。该

多重比较结果体现了在复杂路线中个体与导航地图进行被动交互，确实可以减少寻路时的转弯错误次数，特别是在固定地图辅助下的错误次数有明显的下降，体现了固定地图的显著优势。

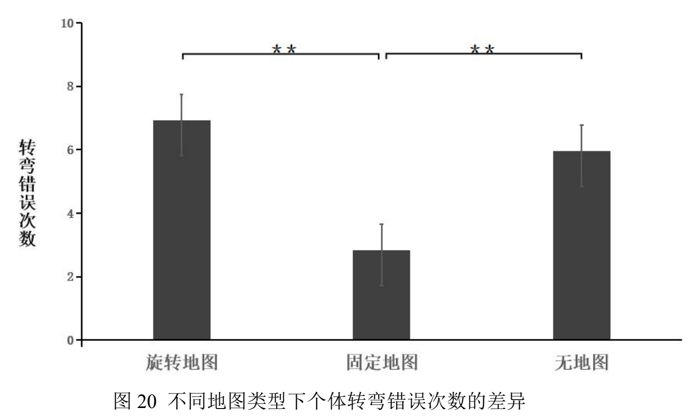


图 20 不同地图类型下个体转弯错误次数的差异

注：***$p < 0.001$，**$p < 0.01$，*$p < 0.05$

2)转弯正确率

转弯正确率在地图类型上主效应显著，$F(2, 42) = 5.10$，$p = 0.010$，$\eta_p^2 = 0.20$。事后多重比较发现，无地图组转弯正确率显著低于固定地图组，$M = -0.09$，$SE = 0.05$， $p = 0.070$；旋转地图组转弯正确率显著低于固定地图组，$M = -0.13$，$SE = 0.04$， $p = 0.003$(见图 21)。该多重比较结果体现了在复杂路线中个体在被动交互方式下使用固定地图的显著优势。其余主效应及交互作用均不显著，$ps > 0.05$。

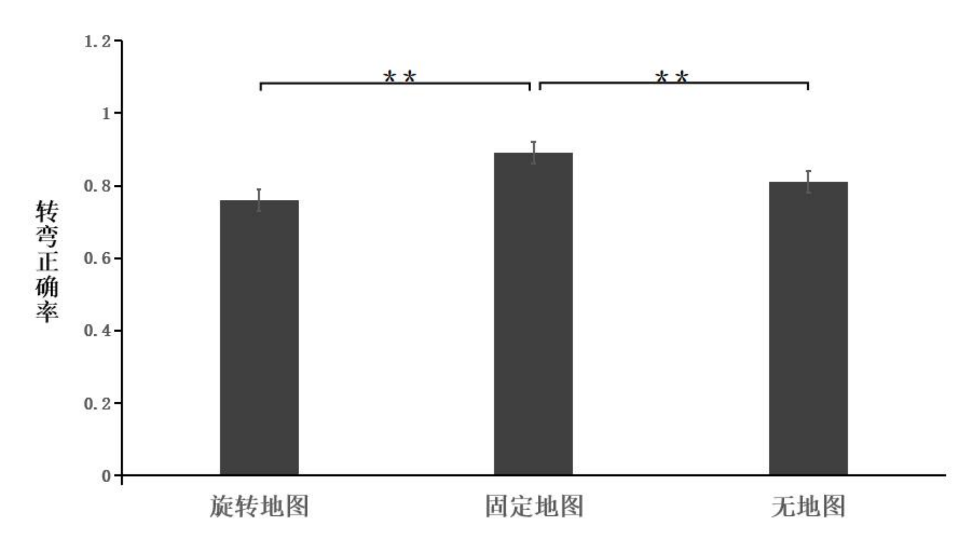


图 21 不同地图类型下个体转弯错误次数的差异

注：***$p < 0.001$，**$p < 0.01$，*$p < 0.05$

(5)空间知识获取结果分析

三组被试的空间知识的描述性统计结果如表 7 所示。

表 7 个体空间知识的描述性统计($M \pm SD$)

	旋转地图	固定地图	无地图
地标正确识别	32.94 ± 5.50	37.24 ± 5.76	36.93 ± 4.76
识别反应时	1477.26 ± 422.15	1765.56 ± 457.18	1594.86 ± 426.54
地标方向辨认	5.25 ± 2.89	8.41 ± 2.45	5.60 ± 2.82
辨认反应时	1519.64 ± 667.22	1814.00 ± 1023.17	1811.30 ± 855.85
顺序判断任务	60.50 ± 11.96	70.06 ± 9.74	63.73 ± 9.91
判断反应时	1869.15 ± 547.56	2458.45 ± 818.28	2108.27 ± 504.19

1)地标识别任务

地标识别任务在地图类型上主效应边缘显著，$F(2, 42) = 2.85$，$p = 0.069$，$\eta_p^2 = 0.12$。事后多重比较分析发现，无地图组地标识别正确次数显著高于旋转地图，$M = 4.56$，$SE = 2.32$，$p = 0.056$；旋转地图组地标识别正确次数显著低于固定地图组，$M = -4.47$，$SE = 2.25$，$p = 0.053$(见图 22)。该多重比较结果体现了在复杂路线被动交互方式下使用固定地图对地标知识获取具有优势。

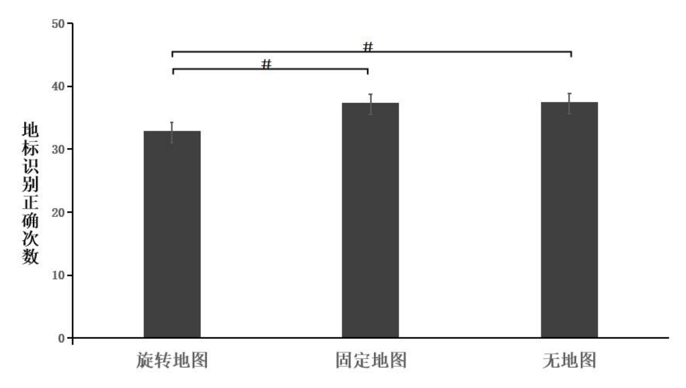


图 22 不同地图类型下个体地标识别正确次数的差异

注：$^{*}p < 0.05$，$^{\#}p < 0.1$

2)地标方向辨认任务

地标方向辨认任务在地图类型上主效应显著，$F(2, 42) = 9.49$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.31$。事后多重比较分析发现，无地图组地标方向正确辨认次数显著低于固定地图组，$M = -4.35(1.22)$，$p = 0.001$；旋转地图组地标识别正确次数显著低于固定地图组，$M = -4.33(1.07)$，$p < 0.001$(见图 23)。多重比较结果体现了在复杂路线被动交互方式下使用固定地图对路线知识获取的优势。

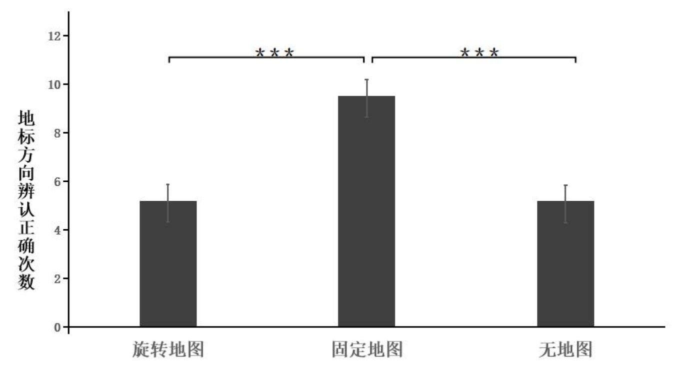


图 23 不同地图类型下个体地标方向辨认正确次数的差异

注：***$p < 0.001$，**$p < 0.01$，*$p < 0.05$

4.3 讨论

联合数据分析结果表明，从寻路绩效来看，固定地图使用显著提升了行人寻路绩效，减少了行人的转弯错误次数，提高了转弯正确率。从空间知识的获取情况来看，固定地图在地标知识和路线知识的获取方面有显著提升，但是旋转地图对空间知识的掌握程度不太理想，甚至低于没有辅助地图的情况。该结果表明，在复杂环境中，使用被动交互方式辅助固定地图作为信息参照框架可以更有效地帮助个体寻路。因为复杂路线相比简单路线会增加个体的认知负荷，而个体的认知资源是有限的，需要在注意地图和注意环境之间平衡，由于旋转地图在寻路过程中是随着个体位置的变化一直不断旋转的，因此将个体更多的注意力转移到关注地图上，减少了个体对环境因素的关注，从而对实际的寻路行为产生消极影响。

5 总讨论

本研究从影响行人寻路的因素出发，探讨路线难度和交互方式对行人寻路绩效的影响，以及辅助地图在其中的增强作用，揭示不同难度路线中个体与导航设备交互的有效信息呈现方式。实验 1 我们探讨路线难度和交互方式对行人寻路绩效的影响，实验 2 在实验 1 的基础上探讨了复杂路线中交互方式和地图类型对行人寻路绩效的影响，最后，研究将实验 2 的最优导航方案与实验 1 复杂路线中没有辅助地图导航条件下的结果进行联合对比分析，以此来探讨实验 2 加入辅助地图后最优的寻路方案相比实验 1 是否真的提高了寻路绩效。本文从行人角度出发，提出优化行人寻路的导航设计方案。

实验 1 结果表明，路线难度和交互方式均会对行人步行导航产生影响，但相较于路线难

度，交互方式的影响较小。Abdurrahman 等人(2022)研究结果：路线困难导致被试犯下更多的错误和较低的导航效率，简单路线具有更高的导航效率。本研究也得到了相同的结果，进一步验证了简单路线的寻路绩效和空间知识获取优于复杂路线。此外，有研究发现辅助导航过程中增加积极主动的学习会对空间环境信息的获取产生积极影响(Münzer et al., 2006)，多数的实证研究证明了主动交互对空间知识获取的优越效果(Herman & Siegel, 1978)，我们的结果也证明了主动交互方式下个体对地标知识的获取程度优于被动交互方式。但是在路线难度和交互方式二者因素共同影响下，在简单路线中使用主动交互方式的寻路绩效和地标知识获取最优，在复杂路线中使用被动交互方式的寻路绩效优于主动交互，却都比简单路线中要差。Abdurrahman 等人(2022)研究结果表明，用户在具有足够多地标的简单路线中能够更有效地进行导航，此情景中用户的认知负荷远低于具有足够多地标的困难路线。而高度复杂的环境阻碍了被试在开始尝试寻路时获得的知识，增加了他们的认知负荷。这可能是本研究中实验 1 复杂路线中的寻路绩效和地标知识相比简单路线差的原因，因为复杂路线加重了个体的认知负荷，阻碍个体高效地获得有用的空间信息，从而导致了个体较差的寻路绩效和地标知识。而在路线知识的获取方面，简单路线和复杂路线却没有显著差异，这可能是因为路线知识是连成片的地标知识，并且本研究顺序判断任务中的场景图片都是学习阶段的，场景中有箭头指示等信息，并且路线长度是一样的，被试在行走过程中不需要单独去记忆某一个单独的地标建筑物，只需要根据场景中的箭头信息和地标出现的先后顺序，就可以大概率判断场景图片出现的先后顺序，并以此获得场景中的路线知识，因此路线难度并没有对个体路线知识的获取产生影响。此外，正如 Péruch 等人(1995)所提出的观点，与被动条件相比，主动条件下的被试对空间布局的回忆更好，这是因为被试能够尊重感知-动作耦合，并将运动信息和视觉信息输入关联起来。因此，实验 1 被试在主动交互方式下转弯正确率和路线知识方面均显著优于被动交互方式，可能是因为在个体在转弯时以自己身体作为信息参考中心，优化了自身的感觉运动集成，从而对转弯方向和整体路线知识的记忆效果更好，体现了主动交互的优势。Péruch 和 Wilson(2004)认为，注意力可能是比交互方式更重要的因素，因为高水平的注意力会掩盖或与主动-被动差异相互作用。在被动交互方式中，由于所有的被试都需要认真观看提前录制好的场景视频，并在简单路线和复杂路线中给予相同的指导语，不需要进行额外的身体运动操纵，因此，个体在两种路线交互方式中都分配了较高的注意力资源，因为高水平的注意力掩盖了主动-被动差异的作用，从而可能解释走路时间、错误次数和地标知识方面二者没

有出现显著差异。除此之外，von 和 Steffens (2012)提出使用的空间知识的测试类型会影响主动导航是否优于被动导航，并且空间学习也受到具体实验操作化的影响。而在本研究中实验 1 中，研究者使用地标识别正确次数来测试被试对场景中地标知识的掌握程度，由于该任务本身就是考察被试对某个地标的记忆，因此，对于主动交互和被动交互的个体来说，被试只需要注意对单独地标的记忆，因而在两种交互方式中没有表现出显著差异。

实验 2 以及实验 1 和 2 的联合分析结果表明，地图类型也会影响行人步行导航的绩效。我们发现使用北上的固定地图在寻路绩效和路线知识的获取方面均显著优于视角跟随的旋转地图，而在地标知识的获取方面两种地图类型无显著差异。根据卡尼曼提出的注意资源限制理论，人的注意资源是有限的，对刺激的识别需要占用认知资源，当认知资源被完全占用时，新的刺激将得不到加工。在复杂路线中寻路时，个体需要较高的注意力，投入了更多的认知资源。Aretz(1991)研究发现，北上固定地图是稳定的，而旋转地图是不稳定的，需要个体在寻路过程中需要不断地转弯和改变方向。在固定地图中，个体只需要看稳定的地图进行路线的记忆，不需要进行额外的认知资源加工；而在旋转地图中，个体需要随着前进方向的变化而不断确定自己的实时位置，并根据自己获取到的空间信息，更新自己在头脑中形成的认知地图，这就需要个体耗费额外的认知资源，因此出现了较差的寻路绩效和路线知识的获取。此外，在地标知识的获取方面，两种地图类型无显著差异，可能是因为个体面对的地标建筑物数目是一样的，而地标知识是指一个人对环境中遇到的物体的记忆(与物体的位置无关)，因此两种地图未表现出显著差异。而相比实验 1 复杂路线中出现的被动交互的优势，在实验 2 中却没有出现，可能是因为在观看场景视频过程中，对地图的观看也分走了个体的一部分注意力，相比实验 1 个体大部分注意力在路线中，实验 2 复杂路线中因为加入了辅助地图，被动交互中观看地图分走了个体的一部分注意力，以及主动交互操作运动耗费的注意力资源，两种交互方式下对注意力的消耗是差不多的，因此在寻路绩效和空间知识的获取方面两种交互方式未出现显著差异。

在复杂路线中加入辅助地图导航可能会影响行人表征环境信息的参考框架。如果一个人使用的是一个参考框架，那么在视频学习后(被动交互)回忆空间知识过程中，个体只需要与空中地图视角对齐一次，而在主动交互后需要对齐多次，即每次转弯后都需要重新表征(Meilinger et al., 2012)。因此，在复杂路线中加入稳定的北上固定地图在寻路绩效和地标知识获取方面有显著优势。结合研究结果，复杂路线行人步行导航的最优方案，需要综合考虑以下几个方面：

(1)路线的复杂度和时间：最优方案应该是最短、最快的路线，以节省步行时间和精力。(2)行走难度：导航方案应该避免嘈杂的路段环境等。(3)个性化需求：导航方案应该基于用户的个性化需求，如偏好路线、场景需求等，提供定制化的导航方案。此外，为了实现最优方案，可能需要使用一些先进的技术手段，如室内定位、实时路况监测等，从而更加精准地为用户提供服务。

本研究具有一定的理论意义。具身认知理论认为，个体对外界环境信息的感知源于身体的感觉，身体在这个过程中起着重要作用，以及身体在与环境互动中身体对信息表征也起着重要的作用。在实验 1 中，简单路线中个体的寻路绩效更好，复杂路线中个体的寻路绩效较差；简单路线中使用主动交互方式的寻路绩效最优，验证了我们身体在个体寻路过程中表征环境信息的重要作用，该结果支持了具身认知理论观点，证明了具身认知理论在人类表征信息过程中的重要作用。而复杂路线中使用被动交互方式比较好，没有体现主动交互的优势，是因为复杂路线中寻路本身就需要个体较高的注意力资源，而卡尼曼的资源限制理论提出，个体的认知资源是有限的，因此当个体把大部分的注意力都集中于环境中的时候，对导航设备的关注度减少，导航设备与人交互方式的影响就减弱，因此复杂路线中两种交互方式在寻路绩效方面没有显著差异，甚至由于主动交互耗费了额外的身体操作负荷，从而导致复杂路线中的被动交互方式在地标知识的获取方面优于主动交互。

同时，本研究也具有一定的现实意义，随着现代经济的发展，我国城市化发展迅猛，道路建设不断拓展，各个城市已经形成了自己的道路网络，道路网络的密集使得原本简单的路线变得复杂起来，这给人们的寻路带来了极大的挑战。本研究通过对比简单路线和复杂路线的寻路绩效，对复杂路线中如何更好地寻路提供优化方案。此外，在经济迅速发展的今天，借助导航设备是人们出行无法避免的结果。因为不同个体对导航设备的依赖程度不同，使用方式不同，而导航设备每次呈现系统默认的导航模式，这可能会阻碍个体心理表征的形成，从而对个体的实际寻路行为产生消极影响，因此需要在不同交互方式和导航地图中寻找一种最优的导航方案，以便更好地服务于人们的出行生活。

但是，本研究仍然存在很多局限性。首先，在实验被试选取方面，由于现实因素，男女性别不均衡，样本量较小，这些个体差异的研究结果很有限，有研究表明年龄、性别都是影响空间能力的重要因素，未来可以扩大被试群体，收集更为广泛的样本数据，提高实验结果的可推广性。其次，由于不同个体在虚拟环境中沉浸感体验程度的差异性，桌面虚拟现实环

境给个体带来的环境的沉浸感没有那么强烈，因此可能会影响被试对环境的主观感受，相比现实真实的环境，研究结果的可推广性还需要进一步研究，未来还需要考虑到个体在寻路过程中的实际运动行为，比如视觉运动、身体运动、前庭系统的运动等，可以考虑通过沉浸式VR 设备或者现场寻路进行实验。第三，本研究在导航过程中仅仅考虑了视觉感觉信息的输入，而个体感知环境信息是多感官的，包括听觉、触觉等。因此未来还需要对多感官导航信息输入进行研究，同时结合现代导航设备，以设计更加优秀的导航方案。

6 结论

总之，本文发现路线难度和交互方式会显著影响个体的寻路绩效，在简单路线中个体与导航设备主动交互就可以获得较高的寻路绩效和空间知识；而在复杂路线中被动交互方式会比主动交互方式获得较好的寻路绩效，但是均比简单路线中要差，因此在复杂路线中加入固定地图来辅助导航会显著提升行人的寻路绩效和地标知识的获取。

参考文献

Abdurrahman, U. A., Zheng, L., & Yeh, S. C. (2022). Cognitive workload evaluation of landmarks and routes using virtual reality. *PLOS ONE*, *17*(5), e0268399.

Aporta, C., & Higgs, E. (2005). Satellite culture: global positioning systems, Inuit wayfinding, and the need for a new account of technology. *Current Anthropology*, *46*(5), 729-753.

Aretz, A. J. (1991). The design of electronic map displays. *Human Factors*, *33*(1), 85-101.

Canter, D. V., & Craik, K. H. (1981). *Environmental Psychology. Journal of Environmental Psychology, 1*(1), 1-11.

Chen, J. L., & Stanney, K. M. (1999). A theoretical model of wayfinding in virtual environments: Proposed strategies for navigational aiding. *Presence*, *8*(6), 671-685.

Daniel, M. P., & Denis, M. (1998). Spatial descriptions as navigational aids: A cognitive analysis of route directions. *Kognitionswissenschaft, 7*(1), 45-52.

Denis, M. (1997). The description of routes: A cognitive approach to the production of spatial discourse. *Current Psychology of Cognition*, *16*, 409-458.

Gardony, A. L., Brunyé, T. T., Mahoney, C. R., & Taylor, H. A. (2013). How navigational aids impair spatial memory:

Evidence for divided attention. *Spatial Cognition & Computation*, *13*(4), 319-350.

Hart, R. A., & Moore, G. T. (1973). *The Development of Spatial Cognition: A Review*. Aldine Transaction

Hayes, A. F. (2018). *Introduction to Mediation, Moderation, and Conditional Process Analysis: A Regression-Based Approach* (2nd ed.). New York, US: The Guilford Press.

Hegarty, M., Richardson, A. E., Montello, D. R., Lovelace, K., & Subbiah, I. (2002). Development of a self-report measure of environmental spatial ability. *Intelligence*, *30*(5), 425-447.

Held, R., & Hein, A. (1963). Movement-produced stimulation in the development of visually guided behavior. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, *56*(5), 872.

Herman, J. F., & Siegel, A. W. (1978). The development of cognitive mapping of the large-scale environment. *Journal of Experimental Child Psychology*, *26*(3), 389-406.

Ishikawa, T., Fujiwara, H., Imai, O., & Okabe, A. (2008). Wayfinding with a GPS-based mobile navigation system: A comparison with maps and direct experience. *Journal of Environmental Psychology*, *28*(1), 74-82.

Kozlowski, L. T., & Bryant, K. J. (1977). Sense of direction, spatial orientation, and cognitive maps. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *3*(4), 590.

Lawton, C. A. (1994). Gender differences in way-finding strategies: Relationship to spatial ability and spatial anxiety. *Sex Roles*, *30*, 765-779.

Merhav, M., & Wolbers, T. (2019). Aging and spatial cues influence the updating of navigational memories. *Scientific Reports*, *9*(1), 11469.

Meilinger, T., Franz, G., & Bülthoff, H. H. (2012). From isovists via mental representations to behavior: first steps toward closing the causal chain. *Environment and Planning B: Planning and Design*, *39*(1), 48-62.

Millonig, A. , & Schechtner, K. . (2007). Developing landmark-based pedestrian-navigation systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *8*, 43-49.

Münzer, S., & Stahl, C. (2011). Learning routes from visualizations for indoor wayfinding: Presentation modes and individual differences. *Spatial Cognition & Computation*, *11*(4), 281-312.

Münzer, S., Zimmer, H. D., Schwalm, M., Baus, J., & Aslan, I. (2006). Computer-assisted navigation and the acquisition of route and survey knowledge. *Journal of Environmental Psychology*, *26*(4), 300-308.

O'keefe, J., & Nadel, L. (1979). Précis of O'Keefe & Nadel's The hippocampus as a cognitive map. *Behavioral and Brain Sciences*, *2*(4), 487-494.

Péruch, P., & Wilson, P. N. (2004). Active versus passive learning and testing in a complex outside built environment. *Cognitive Processing*, *5*, 218-227.

Péruch, P., Vercher, J. L., & Gauthier, G. M. (1995). Acquisition of spatial knowledge through visual exploration of simulated environments. *Ecological Psychology*, *7*(1), 1-20.

Proffitt, D. R., Stefanucci, J., Banton, T., & Epstein, W. (2003). The role of effort in perceiving distance. *Psychological Science*, *14*(2), 106-112.

Raubal, M., & Winter, S. (2002). Enriching wayfinding instructions with local landmarks. *In Geographic Information Science: Second International Conference, GI Science 2002 Boulder, CO, USA, September 25–28, 2002 Proceedings 2* (pp. 243-259). Springer Berlin Heidelberg.

Roskos-Ewoldsen, B., McNamara, T. P., Shelton, A. L., & Carr, W. (1998). Mental representations of large and small spatial layouts are orientation dependent. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *24*(1), 215.

Rousek, J. B., & Hallbeck, M. S. (2011). The use of simulated visual impairment to identify hospital design elements that contribute to wayfinding difficulties. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *41*(5), 447-458.

Schwering, A., Krukar, J., Li, R., Anacta, V. J., & Fuest, S. (2017). Wayfinding through orientation. *Spatial Cognition & Computation*, *17*(4), 273-303.

Shelton, A. L., & McNamara, T. P. (2004). Orientation and perspective dependence in route and survey learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *30*(1), 158.

Siegel, A. W., & White, S. H. (1975). The development of spatial representations of large-scale environments. *Advances in Child Development and Behavior*, *10*, 9-55.

Uttal, D. H. (2000). Seeing the big picture: Map use and the development of spatial cognition. *Developmental Science*, *3*(3), 247-264.

Von Stülpnagel, Rul, & Steffens, M. C. (2012). Can active navigation be as good as driving? a comparison of spatial memory in drivers and backseat drivers. *Journal of Experimental Psychology Applied*, *18*(2), 162.

Wallet, G., Sauzéon, H., Rodrigues, J., & N'Kaoua, B. (2008, October). Use of virtual reality for spatial knowledge transfer: Effects of passive/active exploration mode in simple and complex routes for three different recall tasks. *In Proceedings of the 2008 ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology* (pp. 175-178).

Weisman, J. (1981). Evaluating architectural legibility: Way-finding in the built environment. *Environment and*

Behavior, *13*(2), 189-204.

Wilson, D. S. (1997). Introduction: Multilevel selection theory comes of age. *The American Naturalist*, *150*(S1), s1-s21.

Wolbers, T., & Hegarty, M. (2010). What determines our navigational abilities? *Trends in Cognitive Sciences*, *14*(3), 138-146.

The influence of route difficulty and interaction mode on pedestrian wayfinding performance

Abstract

With the expansion of urban scale and the increase of urban road network density, pedestrians need to find their way in different route environments, especially in complex routes. The use of modern assisted navigation devices may help pedestrians better find their way, but the interaction between humans and navigation devices and the presentation of information on different navigation maps may affect actual wayfinding behavior. Therefore, in the face of increasingly complex road traffic, this paper explores how to improve pedestrian wayfinding behavior performance from the perspective of pedestrians. According to embodied cognition and the factors affecting pedestrian wayfinding, this paper uses virtual reality (VR) technology and psychophysical experiments to explore the optimal navigation scheme of pedestrian wayfinding behavior in different routes.

In Experiment 1, a two-factor design was employed: 2 (route difficulty: simple route, complex route) ×2 (interaction mode: active interaction, passive interaction). Firstly, the impact of route difficulty and human-computer interaction mode on pedestrian wayfinding performance was examined. In Experiment 2, a 2 (interaction mode: active interaction, passive interaction) ×2 (map type: fixed map, rotating map) design was implemented across subjects to investigate further methods for enhancing pathfinding performance under different interaction modes in complex routes. Ultimately, the findings from Experiment 1 and Experiment 2 were collectively analyzed, and a navigation strategy aimed at improving wayfinding performance from the perspective of map types was proposed.

The study revealed that the performance of wayfinding and acquisition of spatial knowledge in simple routes surpasses that in complex routes. However, there is no significant difference in route knowledge acquisition between the two types of routes. In the active interaction mode, the performance of wayfinding and acquisition of landmark knowledge in simple routes is

significantly higher than that in complex routes. Conversely, in the passive interaction mode, there is no significant difference between the two types of wayfinding performance and route knowledge acquisition. Within complex routes, the passive interaction method can yield better landmark knowledge compared to the active interaction method. On the other hand, within complex routes, the use of a fixed map significantly outperforms a rotating map in terms of wayfinding performance and route knowledge acquisition; however, there is no significant difference between them regarding landmark knowledge acquisition. Furthermore, within complex routes and using passive interaction mode, utilizing fixed maps can notably enhance wayfinding performance and landmark knowledge acquisition compared to unassisted maps.

In summary, this article concludes that route difficulty and interaction mode in the spatial environment significantly impact pedestrians' pathfinding performance. In simple routes, individuals actively utilize navigation devices to effectively enhance their pathfinding performance, while in complex routes, passive interaction between individuals and navigation devices with the assistance of fixed maps can effectively improve their pathfinding performance. Therefore, incorporating passive interaction with auxiliary fixed maps into complex routes is the optimal navigation strategy for effectively enhancing wayfinding performance.

Keywords Route difficulty; Interaction mode; Wayfinding performance; Spatial knowledge; VR